



相控阵雷达资源管理技术

XIANGKONGZHEN LEIDA ZIYUAN GUANLI JISHU

毕增军 徐晨曦 张贤志 鲁力 编著

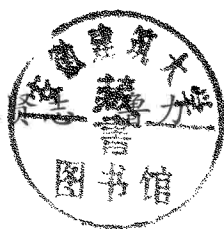


国防工业出版社

National Defense Industry Press

相控阵雷达 资源管理技术

毕增军 徐晨曦 张



编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 提 要

要挖掘和发挥相控阵雷达的最佳作战性能,必须对相控阵雷达资源进行有效的管理及调度。本书从技术角度,分析和研究了相控阵雷达系统资源管理中的相关问题。在对相控阵雷达系统及天线原理进行介绍的基础上,按照相控阵雷达的监视空域划分与波位编排、相控阵雷达波位能量调节与信号检测、相控阵雷达时间资源管理、相控阵雷达工作模式规划、相控阵雷达事件调度五个方面的内容进行阐述,涉及相控阵雷达资源管理的具体策略与技术方法等内容。

本书可作为大专院校雷达相关专业高年级本科生、研究生的教材和参考书,也可供从事雷达装备研制、生产和使用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达资源管理技术 / 毕增军等编著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 8
ISBN 978 - 7 - 118 - 10908 - 5

I. ①相... II. ①毕... III. ①相控阵雷达 - 资源管理
IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 164705 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5 $\frac{7}{8}$ 字数 168 千字

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

本书从技术的角度分析相控阵雷达资源管理问题,从波位编排、波位能量调节、波束能量调度、时间资源管理、工作模式规划和事件调度等方面分别进行阐述,主要描述了资源管理的约束参数和设计方法,内容丰富新颖,理论联系实际。第1章介绍相控阵雷达的结构组成、工作原理以及相控阵雷达体制的技术优势,阐述了资源管理在相控阵雷达中的作用地位、资源管理所涉及的主要内容,以及相控阵雷达资源管理的现状与发展趋势;第2章介绍相控阵天线原理,从线性、平面相控阵天线的基本理论着手,重点介绍有源相控阵天线的原理以及关键部件T/R组件的组成与特点;第3章介绍相控阵雷达监视空域划分与波位编排方法,分别描述了战略、战术相控阵雷达监视空域模型,相控阵雷达常用的坐标系及其转换,相控阵雷达波位的排列方法;第4章介绍相控阵雷达波位能量调节与信号检测技术,从发射脉宽、波束驻留及阵面重构三个方面分析了进行能量调节的方法,介绍了相控阵雷达信号检测技术与特点;第5章围绕相控阵雷达时间资源管理问题,从搜索状态时间资源管理、跟踪状态时间资源管理两个方面,叙述了相控阵雷达时间资源管理的基本理论与方法;第6章针对相控阵雷达工作模式设计规划问题,围绕搜索跟踪策略规划、雷达工作参数设计,从目标特性、雷达能力、资源调度约束关系等方面讨论了工作模式设计方法;第7章介绍相控阵雷达事件调度策略和影响调度策略的主要因素,重点讨论了相控阵雷达的自适应调度模型算法。

本书的内容,既有编写组近几年对相控阵雷达资源管理技术的学习和研究的成果,也有部分内容参阅了张光义院士的《相控阵雷达原理》和胡卫东教授的《相控阵雷达资源管理的理论与方法》等书籍,正是有前人的研究基础,才使编写组在此领域有所认识和拓展,谨向前辈

们的开创性工作表示敬意！由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2016年1月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 相控阵雷达发展简史	1
1.2 相控阵雷达结构组成与工作原理	3
1.2.1 相控阵雷达结构组成	3
1.2.2 波束扫描工作原理	6
1.2.3 时间分割工作原理	8
1.3 相控阵雷达资源管理的重要性	10
1.3.1 任务执行的规划性	11
1.3.2 任务能力的调节性	12
1.3.3 任务调度的管理性	13
1.4 资源管理主要内容及研究现状	16
1.4.1 资源管理的主要内容	16
1.4.2 资源管理研究现状	19
第 2 章 相控阵天线原理	25
2.1 线性相控阵天线	26
2.1.1 线性阵天线方向图函数	26
2.1.2 线性阵天线波束特性	29
2.1.3 线性阵天线栅瓣抑制	32
2.2 平面相控阵天线	37
2.2.1 矩形排列平面阵	37
2.2.2 三角形排列平面阵	43
2.2.3 圆环形排列平面阵	47
2.3 有源相控阵天线原理	50
2.3.1 有源相控阵雷达天线的特点	50

2.3.2	T/R 组件的功能与要求	53
2.3.3	T/R 组件的分类与结构组成	58
第 3 章	相控阵雷达的监视空域划分与波位编排	67
3.1	相控阵雷达监视空域的划分	67
3.1.1	监视空域划分的意义	67
3.1.2	战略相控阵雷达的监视空域划分	68
3.1.3	战术相控阵雷达的监视空域划分	69
3.2	相控阵雷达常用坐标系的定义与坐标转换	71
3.2.1	相控阵雷达常用坐标系的定义	72
3.2.2	坐标变换	74
3.3	波位编排	76
3.3.1	波位排列方法	77
3.3.2	波位编排仿真	78
第 4 章	相控阵雷达波位能量调节与信号检测	82
4.1	波位能量资源调节	82
4.1.1	发射脉宽能量调节	83
4.1.2	波束驻留能量调节	86
4.1.3	阵面重构能量调节	88
4.2	相控阵雷达信号检测	90
4.2.1	相控阵雷达信号检测的特点	90
4.2.2	大时宽带宽积信号在相控阵雷达中的应用	94
4.2.3	短脉冲串信号检测	95
4.2.4	多门限检测	96
第 5 章	相控阵雷达时间资源管理	99
5.1	时间资源配置约束因素	99
5.2	搜索状态时间资源管理	101
5.2.1	搜索数据率与帧周期	101
5.2.2	搜索状态下的控制参数	105
5.2.3	常用搜索方式	111
5.3	跟踪状态时间资源管理	115
5.3.1	数据率与目标容量	115

5.3.2	工作方式与时间资源管理	120
5.3.3	多目标跟踪与资源管理	126
5.4	时间能量资源的调节与约束	132
5.4.1	能量调节的主要参数与措施	133
5.4.2	能量调节主要约束关系	138
第6章	相控阵雷达工作模式规划	142
6.1	相控阵雷达工作模式设计	142
6.1.1	搜索策略设计	142
6.1.2	搜索参数设计	144
6.1.3	跟踪策略与跟踪参数设计	147
6.2	远程预警相控阵雷达工作模式规划	148
6.2.1	弹道导弹预警探测模式规划	149
6.2.2	其他工作模式介绍	156
第7章	相控阵雷达事件调度	159
7.1	事件调度策略	159
7.1.1	固定模板调度策略	160
7.1.2	多模板调度策略	162
7.1.3	部分模板调度策略	163
7.1.4	自适应调度策略	163
7.2	影响调度策略的主要因素	164
7.2.1	各种工作方式的相对优先级	165
7.2.2	调度间隔的选择	166
7.2.3	雷达资源与设计条件约束	168
7.3	自适应调度算法	170
7.3.1	雷达事件综合优先级	170
7.3.2	无时间窗的自适应调度算法	173
7.3.3	时间窗的合理性	174
7.3.4	有时间窗的自适应调度算法	175
7.3.5	基于变长度调度间隔的自适应资源调度算法	176
参考文献		178

第 1 章 概 述

相控阵雷达(Phase Array Radar, PAR)是具有相控阵天线的雷达;相控阵天线是采用电子方法实现波束无惯性扫描的阵列天线;实现波束扫描的电子方法有相位控制、频率控制和时间控制。与传统的机械扫描雷达相比,相控阵雷达最显著的特点就是波束的无惯性快速扫描能力。从技术优势上看,相控阵雷达体制从根本上解决了大型天线与机械转动间的矛盾,缓解了目标容量与数据率间的矛盾,为远程、高速目标的搜索与跟踪提供了有效的技术途径。从任务执行能力看,相控阵雷达波束的无惯性扫描能力,一方面为任务执行的灵活性创造了条件,例如,搜索、跟踪任务执行的时间分割性,探测能力的能量调节性以及多任务执行的管理性等;另一方面使得相控阵雷达任务执行对资源管理与任务调度具有依赖性。相控阵雷达不再是“电气”和“机械”的组合,而是设备(雷达硬件)和管理(算法软件)的综合体。随着相控阵雷达朝着多功能、自适应、智能化方向的深入发展,资源管理与任务调度在相控阵雷达中必将发挥越来越重要的作用,占据越来越重要的地位。

本章简要介绍相控阵雷达的结构组成、工作原理以及相控阵雷达体制的技术优势,其中,波束扫描原理、时间分割原理和事件调度原理是相控阵雷达所特有的工作原理,是理解相控阵雷达工作特点和进一步学习相控阵雷达资源管理的基础。叙述了资源管理在相控阵雷达中的作用地位、资源管理所涉及的主要内容,以及相控阵雷达资源管理的现状与发展趋势。

1.1 相控阵雷达发展简史

雷达(Radio detection and ranging, Radar)发明于 20 世纪 30 年代,

至今已有 80 多年的历史。1864 年,麦克斯韦提出电磁场理论。1886 年,赫兹通过实验证明电磁波的存在。1912 年,泰坦尼克(Titanic)号邮轮撞击冰山沉没,促进了利用无线电波对人眼看不见的物体进行探测和定位的研究。1922 年,马可尼用短波无线电波探测到了船舶的存在,概念雷达由此诞生。从雷达的命名可知,最初人们赋予雷达的任务,一是目标检测;二是目标定位测量。1935 年,英国人用雷达探测到 60km 处的轰炸机,1937 年初正式布置雷达“链条”(chain),用于探测发现飞机、舰船目标。从此,雷达技术从概念、理论研究走向应用层面,并在军事需求的巨大推动下进入了高速发展阶段。

相控阵雷达的发展主要受三大因素的影响。一是对雷达探测能力的新需求。20 世纪 60 年代随着美国、苏联两大超级大国军备竞赛的不断升级,解决洲际弹道导弹与人造地球卫星的全天候预警、监视问题变得日益紧迫。1957 年,苏联发射了第一颗人造地球卫星。1961 年,第一个宇航员上天。特别是 1964 年古巴导弹危机事件后,美国将监视外空目标任务提到了战略高度,直接催生了相控阵雷达的诞生与发展。二是雷达技术的快速发展。早在 20 世纪 40 年代雷达诞生的初期,人们就已经发现:通过改变阵列天线单元间的信号相位来调节天线波束指向,这就是早期的相控阵天线原理。这一原理早期主要用于定向短波通信的天线设计中。在声纳阵列系统中,也曾利用这一原理实现声纳波束指向的快速扫描与多波束覆盖。三是微电子与计算机等相关技术的发展支撑。

一般,事物发展大都遵循先小后大、先简单后复杂的历程;而相控阵雷达的发展却是先研制大型的、复杂的、具有超远程探测能力的二维扫描相控阵雷达,然后才推广至小型的、相对简单的、距离较近的战术相控阵雷达,这反映了相控阵雷达发展的最初需求是来自对卫星、弹道导弹等目标的探测。

与传统防空预警雷达相比,要实现弹道导弹预警和空间目标监视,必然面临两个方面的问题:一是需要足够的发射功率和天线增益来满足远距离探测的能量需求;二是需要更高的数据率来满足对高速目标的精密跟踪。在技术途径上,采用大口径阵列天线与多发射机组合的方法,既可提高发射功率和天线增益,又可缓解方位分辨力与远距离探

测之间的矛盾。但是增大天线尺寸后,会给天线的机械扫描带来极大的困难,即使通过提高驱动功率能让大型天线转动起来,天线转速也难以提升,无法满足观察外空目标的数据率要求。退一步讲,即使采用馈电喇叭口转动代替天线反射面转动的方法,在观察远距离目标时,还是存在数据率与目标容量之间的矛盾,一方面是雷达重复周期长,另一方面波束切换必须等待回波信号完全接收才能进行,无法满足多目标、高数据率的搜索跟踪任务。采用相控阵天线之后,上述问题迎刃而解,由于相控阵天线既可以固定不动,又具有波束的快速扫描能力,因此既能极大地增大天线面积,又可缓解数据率与目标容量之间的矛盾。

在相控阵雷达发展过程中,雷达技术的快速发展为相控阵雷达发展奠定了重要的技术基础,例如,脉冲压缩技术、数字波束形成技术(DBF)、动目标显示/检测技术(MTL/MTD)、合成孔径技术(SAR)等。另外,微电子技术、计算机技术、数字集成电路技术和软件工程技术等的高速发展都给相控阵雷达的发展注入了新的活力,为充分发挥相控阵雷达技术优势提供了极其重要的技术保障。

20世纪70年代后,由于相控阵体制在多任务执行方面的技术优势,加上相控阵雷达成本的逐步降低,相控阵雷达在很多领域得到了快速发展,涉及反导预警、防空预警、空间目标监视、航空管制、引导识别、战场侦察、电子对抗、通信遥感等众多领域,雷达载体也从地面发展到舰载、机载、星载,甚至弹载等形式。

1.2 相控阵雷达结构组成与工作原理

1.2.1 相控阵雷达结构组成

与传统机械扫描雷达相比,相控阵雷达在结构组成上有三大特点:一是相控阵天线是典型的多通道系统,为实现波束的无惯性扫描,相控阵雷达具有特殊的馈电、馈相网络和波控系统;二是相控阵雷达的馈电、馈相网络具有明显的多样性,这种多样性在很大程度上体现在发射/接收组件(以下简称T/R组件)功能结构的多样性上;三是相控阵

雷达特别是二维扫描相控阵雷达波束的无惯性快速扫描能力,既为相控阵雷达工作的灵活性创造了条件,又导致了相控阵雷达任务执行对控制管理软件的依赖性,因此,控制管理功能软件也是相控阵雷达的重要组成部分。

典型的相控阵雷达系统结构组成如图 1-1 所示,主要由收发共用阵列天线、射频 T/R 组件、馈电馈相网络、发射信号激励、多通道接收机、接收波束形成、信号处理、数据处理、频率源与时序控制、波束控制器、雷达控制器等组成。其简要工作过程为:发射时,由频率源产生发射信号,经发射激励驱动后送馈电馈相网络,再经 T/R 组件送往各天线单元;接收时,各天线单元接收的信号,经 T/R 组件和馈电馈相网络后送往多通道接收机,再经接收波束形成、信号处理、数据处理后送往终端显示。雷达控制器用于管理和控制雷达各分系统的工作状态和工作参数,波束控制器用于控制移相器实现波束扫描。

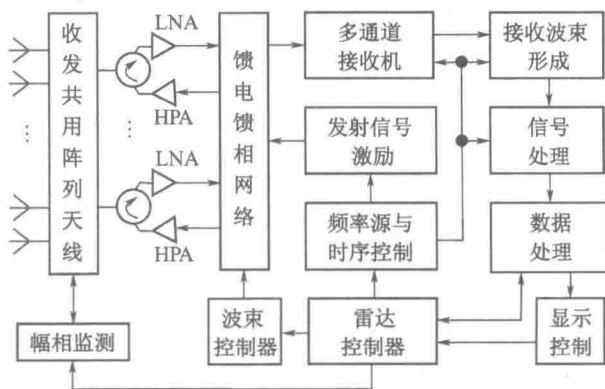


图 1-1 典型的相控阵雷达系统结构组成

在有源相控阵雷达中,T/R 组件的功能结构在很大程度上决定了相控阵雷达系统的结构组成^[1]。按 T/R 组件输入/输出信号的频率可分为三类:一是射频 T/R 组件;二是中频 T/R 组件;三是视频(或数字)T/R 组件。其中,射频 T/R 组件功能结构最简单,数字 T/R 组件最复杂,但在集成相控阵雷达系统时,对应的馈电馈相网络的复杂性程度则刚好相反,数字 T/R 组件对应的馈电馈相网络最简单,射频 T/R 组

件对应的馈电馈相网络最复杂。

以数字 T/R 组件集成的相控阵雷达系统为例。如图 1-2 所示, 在每个数字 T/R 组件中, 发射通道包含 DDS 发射信号产生 (含相位控制)、信号上变频、高功率放大等功能; 接收通道包含 LNA、通带滤波、信号下变频、正交双通道采样 (模数变换) 等功能。可以说, 每个数字 T/R 组件都具有完整的发射与接收功能。因此, 相控阵雷达集成是以数字 T/R 组件为核心, 通过光纤以总线形式上传控制信号, 数字化接收信号通过下传数字光纤送往阵列信号处理实现数字波束形成 (DBF)。

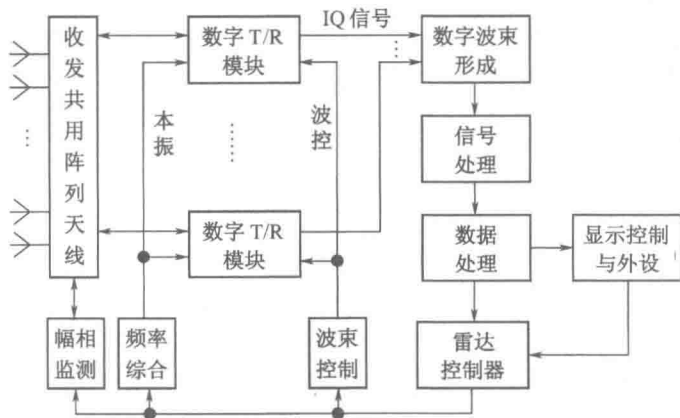


图 1-2 数字有源相控阵雷达系统组成框图

在相控阵雷达系统中, 相控阵天线和雷达控制器是相控阵雷达的两大核心。相控阵天线是相控阵雷达的硬件核心, 衡量相控阵天线性能的重要技术指标是功率孔径积 ($P_{av} A_r$) 或有效功率孔径积 ($P_{av} A_r G_r$), 其中, P_{av} 为发射机平均功率, A_r 为接收天线面积, G_r 为发射天线增益。描述相控阵天线的五大要素包括天线阵元数、阵元结构、阵元排列、馈电方式、馈相方式。其中, 阵元数和 T/R 组件输出功率决定了相控阵天线的发射功率; 阵元结构由雷达工作频段和极化探测需求决定, 主要有喇叭口馈源、伞形振子、裂缝波导等形式; 阵元排列主要有矩形排列、三角形排列、圆形排列、稀布阵和共形阵等形式; 馈电方式大

体上可分为空间馈电和强制馈电,而强制馈电又分为串并组合、光电组合、模数组合等多种实现形式;馈相方式总体上分为相位控制和时延控制。

雷达控制器是相控阵雷达的控制管理中心,资源管理和波束调度是其主要内容。与传统机械扫描雷达相比,相控阵雷达不再是“电气”与“机械”的组合,而是“硬件”与“软件”的有机结合。

1.2.2 波束扫描工作原理

相控阵天线波束形成属空域滤波技术范畴,包括两个方面:一是波束指向控制(或称波束扫描控制);二是波束形状控制,如副瓣电平、旁瓣凹口的控制。与之对应,相控阵雷达波控原理可概括为两句话:一是波束指向始终与平直的等相位面垂直;二是波束形状与天线口径照射函数(电场分布)满足傅里叶变换关系。通常,相控阵雷达发射波束和接收波束相互独立控制,发射波束由馈电馈相来实现,接收波束由DBF来实现。

以线性相控阵天线为例,如图1-3所示。若线性阵有 N 个阵元 r_0, r_1, \dots, r_{N-1} ,阵元间距为 d 。为使波束指向 θ_B (波束偏离阵面法向的角度),只需形成图1-3所示的平直等相位面,即各阵元的辐射信号到达此平面时相位相同。实现等相位面方法的主要有两种:一是相位控制;二是时延控制。

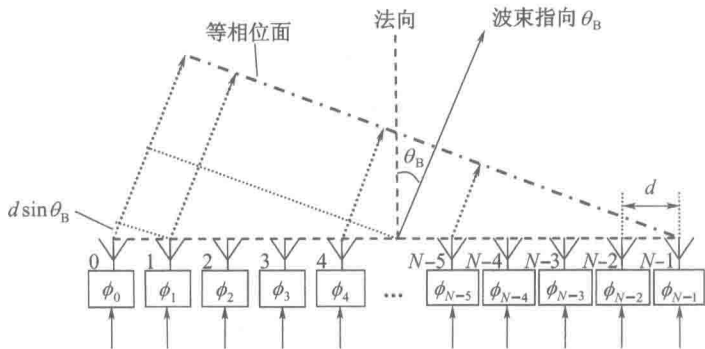


图1-3 波束指向移相控制原理

相位控制波束指向时,各阵元辐射信号同时出发,但信号相位不同。相邻阵元间相位差与波束指向关系为

$$\Delta\phi_B = 2\pi \frac{d\sin\theta_B}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中, d 为阵元间距; θ_B 为波束指向; λ 为信号波长; $\Delta\phi_B$ 为相邻阵元相位差。相位控制波束指向时, 有三点值得注意: 一是移相量与发射信号频率有关, 因此移相控制只能适应窄带信号; 二是移相只在 2π (360°) 内进行, 当移相量大于 2π 时, 需去除整数倍 2π 后再移相; 三是波束指向与相邻阵元间相位差是非线性关系, 且 θ_B 越小则 $\Delta\phi_B$ 越小, 移相控制要求越高。

时延控制波束指向时, 各阵元辐射信号相位相同, 但信号出发时刻不同, 如图 1-4 所示。相邻阵元间发射延时量与波束指向关系为

$$\Delta\tau_B = \frac{d\sin\theta_B}{c} \quad (1-2)$$

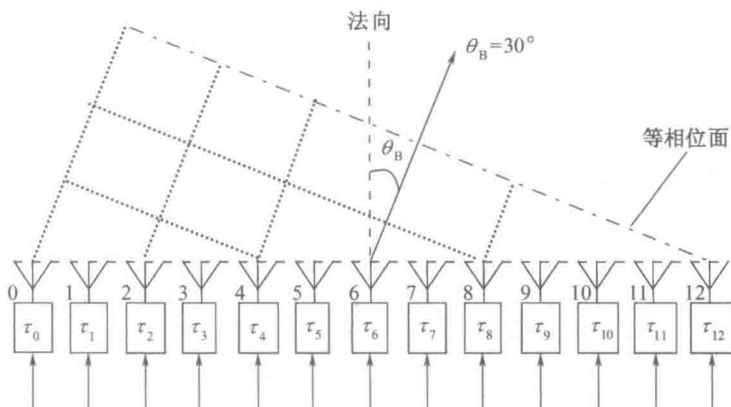


图 1-4 波束扫描时延控制原理

式中, $\Delta\tau_B$ 为相邻阵元时延量; c 为光速。与相位控制相比, 波束指向采用时延控制时也有三点值得注意: 一是时延控制与发射信号频率无关, 因此对发射信号带宽没有限制; 二是时延控制必须是真延时, 没有省略整周期的概念; 三是波束指向与相邻阵元时延量间为非线性关系,

且 θ_B 越小则 $\Delta\tau_B$ 越小,时延控制越精细。在频率高、口径大、波控精度高的情况下,时延控制存在动态范围大、量化精度高、工程实现困难等问题。

1.2.3 时间分割工作原理

由于雷达波束总会存在一定宽度,因此目标穿越波束宽度总是需要时间的,只要在目标穿越时间内重访搜索区域即可确保目标的有效捕获,即目标搜索是允许存在时间缝隙的。同理,在目标跟踪时,由于被跟踪目标的运动行为在一定时间内是可以预测的,因此,目标跟踪也存在一个允许的时间缝隙,在时间缝隙内按照预测的目标位置进行波束照射即可确保对该目标的连续跟踪。由此可知,搜索或跟踪任务的采样间隔只要不超过一定的时间缝隙长度,则在时间安排上具有一定的灵活性和独立性,即在时间上是可分割的。这就为设计搜索跟踪关系提供了灵活性。

传统机械扫描雷达由于波束扫描方式被固化,因此,只能采用边搜索边跟踪工作方式(Track While Search, TWS),即没有专门的跟踪波束,目标跟踪只是利用搜索状态获得的目标点迹数据通过数据处理来实现。而相控阵雷达可利用波束扫描的灵活性来实现搜索加跟踪(Track And Search, TAS)工作方式,即搜索任务和跟踪任务可利用时间分割原理相对独立地完成。TAS 工作方式是代表相控阵雷达技术优势的重要工作方式。

1. TAS 工作方式

TAS 工作方式基于相控阵雷达波束扫描的灵活性,以时间交替的方式合理安排搜索波束与跟踪波束,实现雷达搜索与跟踪功能。TAS 工作方式的优点,一是搜索与跟踪可以按不同数据率执行,可以在维持对多目标跟踪的前提下继续维持对规定空域的搜索能力,可以有效地解决对多批、高速、高机动目标的跟踪问题。二是通过合理安排时间交替关系,解决搜索、目标确认、跟踪起始、目标跟踪、跟踪丢失处理等不同工作状态遇到的特殊问题,使相控阵雷达具有多任务、多目标执行能力;能按照雷达工作环境的变化,自适应调整工作方式,按目标 RCS 大小、目标所在远近以及目标重要性或目标威胁程度等改变雷达工作方

式并进行雷达信号的能量分配。

相控阵雷达时间分割执行搜索和跟踪示意图如图 1-5 所示。假设雷达监视空域内有两个目标,相控阵雷达对这两个目标的跟踪采样率不同,目标 1 的跟踪采样率高于目标 2,此时相控阵雷达就需要同时完成跟踪目标 1、目标 2 以及空域的搜索任务。由于两个目标的跟踪数据率比搜索数据率要高,所以搜索任务执行一次的时间,可以插入执行多次的跟踪任务,即图 1-5(a)所示的将跟踪时间安插到搜索时间内,在需要执行跟踪任务时中断搜索任务,将天线波束用于目标跟踪,跟踪完毕后再继续进行搜索。假设搜索全部空域的时间为 $T_{s1} + T_{s2} + T_{s3} + T_{s4}$,在此过程中共进行了目标 1 的 4 次跟踪以及目标 2 的两次跟踪。总体上看,就相当于相控阵雷达在执行搜索的同时,还完成了两个目标的跟踪,即表现出其多功能的特性。

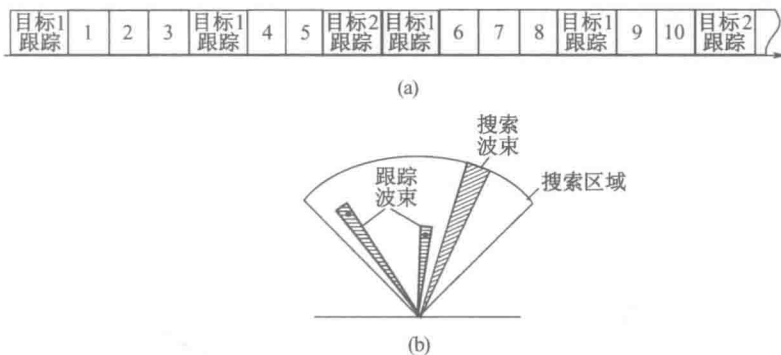


图 1-5 相控阵雷达时间分割执行搜索和跟踪示意图

(a) 搜索与跟踪时间分配; (b) 搜索与跟踪波束示意图。

2. 顺序多波束与交错多波束

相控阵雷达顺序多波束和交错多波束工作是时间分割应用的另一种重要方式。多波束工作方式既为相控阵雷达工作模式设计创造了更大的灵活性,又可成倍提高雷达搜索、跟踪数据率和任务执行能力。

在相控阵雷达中,利用波束切换的灵活性,多波束形式主要有两种,一是时间顺序多波束,如图 1-6(a)所示,图中发射的 3 个脉冲是